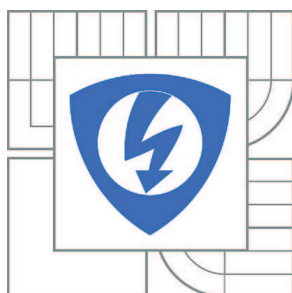


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

# **VYHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ S OPTICKÝMI KONCENTRÁTORY**

EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS WITH OPTICAL CONCENTRATORS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

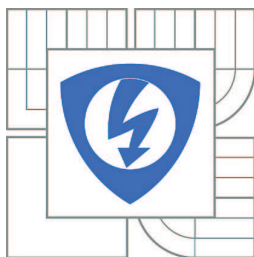
**Bc. VLASTIMIL PONČÍK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D., ÚPT  
AVČR Brno**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Vlastimil Pončík

**ID:** 98435

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Vyhodnocení vlastností fotovoltaických článků s optickými koncentrátory**

## POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou fotovoltaických článků. Proměřte vybrané sady fotovoltaických (FV) článků a koncentrátorových prvků.

Zaměřte se na elektrické a tepelné vlastnosti soustavy. Vypracujte srovnávací studie různých FV uspořádání z technického a ekonomického hlediska.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D., ÚPT AVČR Brno

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce pojednává o fotovoltaických systémech, zvláště pak o těch s koncentrováním slunečního světla pomocí koncentrátorů, umístěných přímo na panelu.

Fotovoltaický systém s koncentrátorem využívá sluneční světlo koncentrované na fotovoltaický povrch, pro efektivnější výrobu elektrické energie.

Fotovoltaický článek s koncentrátorem obsahuje difrakční optické prvky, které soustředí světlo na fotovoltaický čip. Plochý polykarbonátový optický prvek má na svém povrchu difrakční mřížku.

## **Abstract**

This work deals about the photovoltaic systems, especially with concentration of the sunlight in use of concentrators that are placed direct on the panel. Concentrated photovoltaics systems employ sunlight concentrated onto photovoltaic surfaces for the purpose of more efficient electrical power production.

A photovoltaic cell with concentrator includes diffractive optical elements that concentrate light on a photovoltaic chip

Flat polycarbonate optical element has diffractive gratings on its surface.

## **Klíčová slova**

fotovoltaika - fotovoltaický článek - optický koncentrátor - difrakční mřížka -  
Elektronová litografie

## **The Key words**

photovoltaic - photovoltaic cell - optical concentrator - diffractive grating- elektron beam  
lithography

PONČÍK, V. *Vyhodnocení vlastností fotonvoltaických článků s optickými koncentrátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 29 s.

Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Kolařík , Ph.D., ÚPT AVČR Brno.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vyhodnocení vlastností fotovoltaických článků s optickými koncentrátory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. května 2011..... podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Kolegovi Bc. Petru Chalupovi za aktivní spolupráci při realizaci laboratorních měření.

Dále děkuji pracovníkům ÚPT AV ČR Brno, oddělení elektronové litografie: Ing. Miroslavu Horáčkovi Ph.D., Mgr. Františku Matějkovi, Ing. Milanu Matějkovi, Stanislavu Královi, Mgr. Michalu Urbánkovi.

V Brně dne 26. května 2011 ..... podpis autora

# OBSAH

|   |    |
|---|----|
| OBSAH.....  | 6  |
| 1 Úvod .....  | 7  |
| 2 Fotovoltaika .....                                  | 8  |
| 2.1 Historie fotovoltaiky .....                       | 8  |
| 2.2 Vývoj fotovoltaických článků .....                | 8  |
| 2.3 Fotovoltaický – solární článek .....              | 10 |
| 2.4 Fotovoltaický článek s koncentrátorem .....       | 12 |
| 2.5 Fotovoltaický panel.....                          | 14 |
| 2.6 Základní měření na fotovoltaických článcích ..... | 15 |
| 2.6.1 Měření naprázdno .....                          | 16 |
| 2.6.2 Měření nakrátko.....                            | 16 |
| 2.6.3 Měření Volt – Ampérové charakteristiky .....    | 17 |
| 2.7 Přírodní podmínky pro fotovoltaiku .....          | 18 |
| 2.7.1 Přírodní podmínky v ČR .....                    | 18 |
| 2.7.2 Přírodní podmínky v Evropě .....                | 19 |
| 3 Koncentrátorové prvky .....                         | 20 |
| 3.1 Ohyb světla na optické (difrakční) mřížce.....    | 20 |
| 3.2 Návrh difrakčních koncentračních struktur .....   | 21 |
| 3.3 Elektronová litografie .....                      | 23 |
| 4 Ekonomické aspekty fotovoltaiky .....               | 24 |
| 4.1 Ekonomická návratnost.....                        | 24 |
| 4.2 Mechanismus výkupních cen a zelených bonusů ..... | 24 |
| 5 Praktická část diplomové práce .....                | 26 |
| 7 Použitá literatura.....                             | 27 |

# 1 Úvod

Ubývající zásoby fosilních paliv, rozsáhlé znečištění životního prostředí, hrozba globálního oteplování a přitom rostoucí požadavky na spotřebu energie vedou společnost ke stále se zvyšujícímu zájmu o využití obnovitelných zdrojů energie.

V současné době jsou v ČR nejrozšířenějším zdrojem energie fosilní paliva a to především uhlí a zemní plyn. Tato paliva sice patří mezi přírodní zdroje, ale rozhodně je nemůžeme považovat za zdroje nevyčerpatelné.

Mluvíme-li o obnovitelných zdrojích energie máme především na mysli využívání přírodních energetických zdrojů k výrobě elektrické a tepelné energie. Jedná se o zdroje, které jsou v podstatě nevyčerpatelné a stále se obnovující, jako je slunce, voda, vítr a biomasa.

Získávání elektrické energie přeměnou z energie sluneční (slunečního záření) je z hlediska životního prostředí nejčistším a nejšetrnějším způsobem její výroby.

Všechny zdroje energie, které jsou na Zemi dostupné, pocházejí z energie Slunce. Využívání této energie pro výrobu elektřiny však umožnila teprve moderní technologie fotovoltického článku.

Množství sluneční energie je v jednotlivých územních lokalitách ovlivněno především geografickou polohou, roční dobou, místními meteorologickými podmínkami, sklonem plochy dopadu slunečních paprsků a odrazovými plochami v okolní krajině. Elektrický výkon fotovoltického článku je pak dán jeho celkovou plochou a účinností.

Diplomová práce je zaměřena na studium dostupné literatury týkající se různých druhů používaných fotovoltických článků a koncentrátorových prvků, shrnutí poznatků o jejich složení a vlastnostech. Na teoretickou přípravu potom navazuje praktická část práce, jejíž úkolem bylo proměření sady prototypů koncentrátorových prvků. Orientačně jsme se též zabývali ekonomickými aspekty výroby článků s koncentrátory oproti klasickým fotovoltickým článkům.

## **2 Fotovoltaika**

Fotovoltaika je technologie umožňující výrobu elektrické energie přímo ze Slunce, je to tedy technologie s neomezeným růstovým potenciálem a časově neomezenou možností výroby elektrické energie. Jde ale také o vyspělé průmyslové odvětví, které ve světě zažívá neobvyklý rozvoj a pozitivně ovlivňuje nejen obchodní aktivity, ale např. i zaměstnanost nebo kvalifikaci vědeckých pracovníků. Toto odvětví nabývá na významu zejména vzhledem k narůstající energetické závislosti mnohých zemí, hrozící energetické krizi, ekologickým a bezpečnostním otázkám klasických způsobů výroby energie a dalším negativním aspektům současné i budoucí energetiky [1].

### **2.1 Historie fotovoltaiiky**

Objev fotovoltaiického jevu se připisuje A. E. Becquerelovi, který jej odhalil při experimentech v roce 1839. Kolem r. 1883 byl sestaven první selenový fotočlánek s tenkou vrstvou zlata (Charles Fritts, účinnost pod 1 %). V roce 1904 fotovoltaiický jev fyzikálně popsal Albert Einstein a v roce 1916 Robert Millikan experimentálně potvrdil platnost tohoto principu. První skutečný fotovoltaiický článek s 6 % účinností byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v Bellových laboratořích (G.L. Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller) [1].

Větší rozvoj fotovoltaiiky nastává v šedesátých letech 20. století s nástupem kosmického výzkumu a následně v sedmdesátých letech v souvislosti s celosvětovou ropnou krizí [1].

### **2.2 Vývoj fotovoltaiických článků**

#### **První generace**

První generací se nazývají fotovoltaiické články využívající jako základ křemíkové desky. Jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90 %) a dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální struktury až 24 %). Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech. Přestože je jejich výroba relativně drahá (a to zejména z



důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), budou ještě v několika dalších letech na trhu dominovat [1].

## **Druhá generace**

Impulem pro rozvoj článků druhé generace byla především snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu – křemíku. Články druhé generace se vyznačují 100krát až 1000krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film) a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokrytalického křemíku (případně silicon-germania, či silicon-karbidu, ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se, označované obecně jako CIS struktury). S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů (a tedy za předpokladu velkosériové výroby i k poklesu ceny), nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší (v sériové výrobě obecně pod 10%). Nespornou výhodou tenkovrstvých článků je možnost volby substrátu (na něž se tenkovrstvé struktury deponují) a v případě použití flexibilních materiálů (organické, kovové či textilní folie) i značně širší aplikační sféra. Komerčně se začaly články druhé generace prodávat v polovině osmdesátých let [1].

## **Třetí generace**

Solární články třetí generace jsou zatím ve stádiu vývoje. Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra („proudový“ zisk), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů („napětíový“ zisk fotovoltaických článků). Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

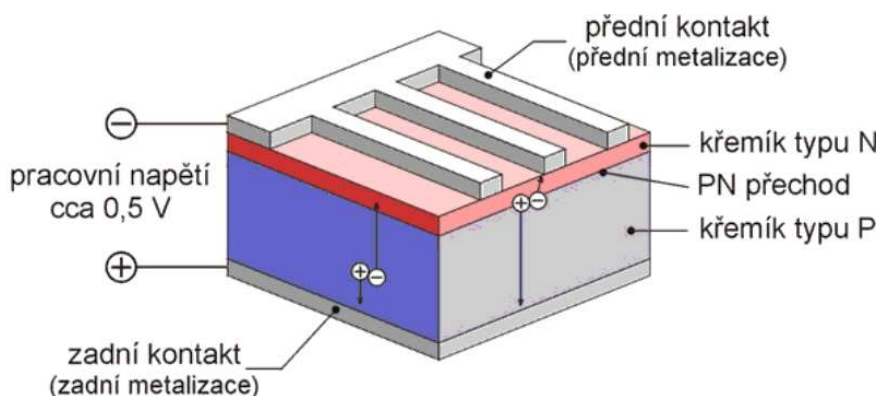
- vícevrstvé solárních články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách

- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů) [1].

Zatím jsou z článků třetí generace prakticky využívány pouze vícevrstvé struktury, z nichž každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů [1].

## 2.3 Fotovoltaický – solární článek

Fotovoltaika využívá přímé přeměny světelné energie na elektrickou energii v polovodičovém prvku označovaném jako fotovoltaický nebo také solární článek. Solární článek je velkoplošná dioda alespoň s jedním PN přechodem. V ozářeném solárním článku jsou generovány elektricky nabitě částice (páry elektron – díra). Elektrony a díry jsou separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl mezi „předním“ (-) a „zadním“ (+) kontaktem solárního článku. Vnější obvodem zapojeným mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, jež je přímo úměrný ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření.

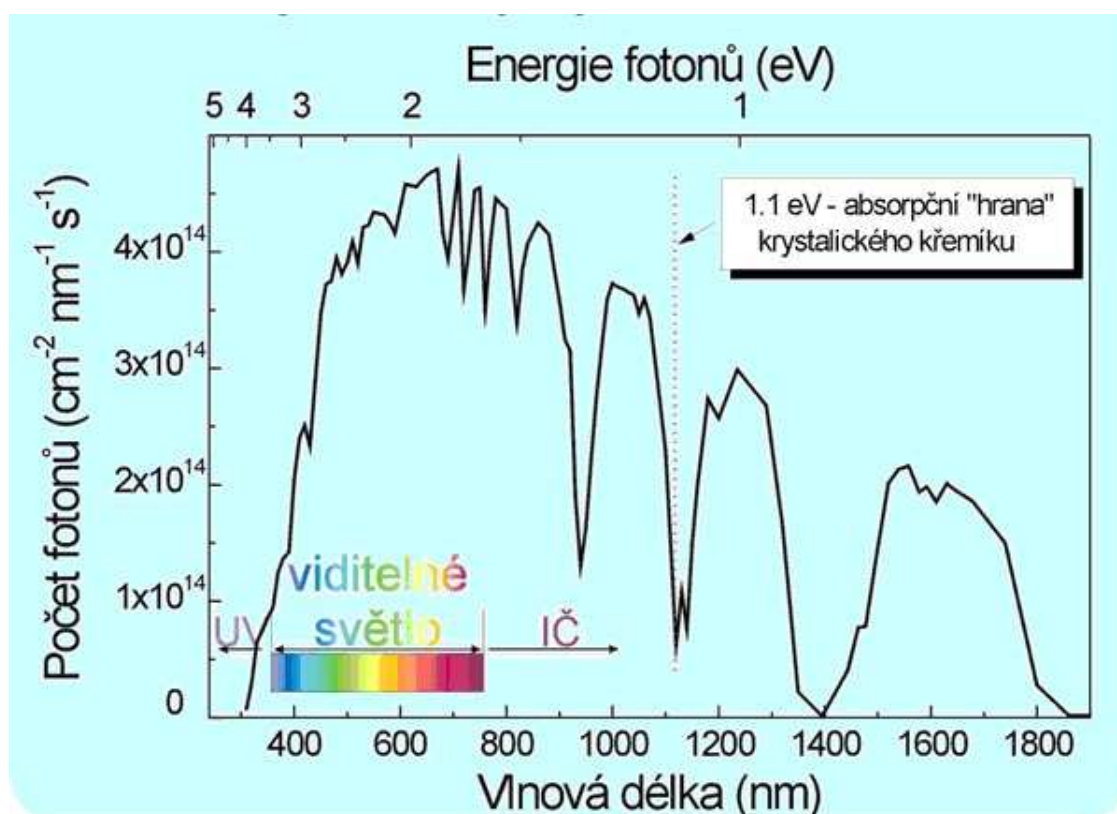


**Obr. 1:** Fotovoltaický článek [4]

Napětí jednoho článku s hodnotou přibližně 0,5 V je příliš nízké pro další běžné využití. Sériovým propojením více článků získáme napětí, které je již použitelné v různých typech fotovoltaických systémů. Standardně jsou používány sestavy pro jmenovité provozní napětí

12 nebo 24 V. Takto vytvořené sestavy článků v sériovém nebo i sériovo-parallelním řazení jsou hermeticky uzavřeny ve struktuře krycích materiálů výsledného solárního panelu.

Sluneční záření dopadající na povrch Země (po průchodu atmosférou) se skládá z fotonů různých vlnových délek a tedy i různých energií. Z celého slunečního spektra je lidským okem viditelná pouze jeho část v oblasti 380 až 780 nanometrů. Oblast s kratší vlnovou délkou (větší energií) se nazývá ultrafialová (UV) a oblast s delší vlnovou délkou se nazývá infračervená (IČ)



Obr. 2: Spektrum slunečního světla [4]

Základním požadavkem na sluneční články je schopnost pohlcovat co nejširší oblast slunečního spektra a co nejlépe využít energii fotonů.

Dopadá-li na křemík foton o energii menší než 1,1 eV (elektronvoltů), projde křemíkem a není absorbován. Když je jeho energie větší než 1,1 eV (tato energie odpovídá šířce

zakázaného pásu  $E_g = E_c - E_v$  a tedy „absorpční hraně“ křemíku), pak je tento foton absorbován a v polovodiči vzniknou volné nosiče náboje - záporný elektron a kladná díra [1].

## 2.4 Fotovoltaický článek s koncentrátorem

Aby se lépe využily drahé solární články, je možné použít odrazné plochy (zrcadla) nebo čočky, které koncentrují sluneční záření na solární článek a umožňují osvětlovat článek mnohem vyššími intenzitami světla. Zatímco běžně vyráběné fotovoltaické články jsou určeny pro práci při osvětlení slunečním zářením o intenzitě  $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$  (1 slunce) [2], články s koncentrátorem mohou na fotovoltaický čip koncentrovat záření o intenzitě desítek až stovek sluncí.

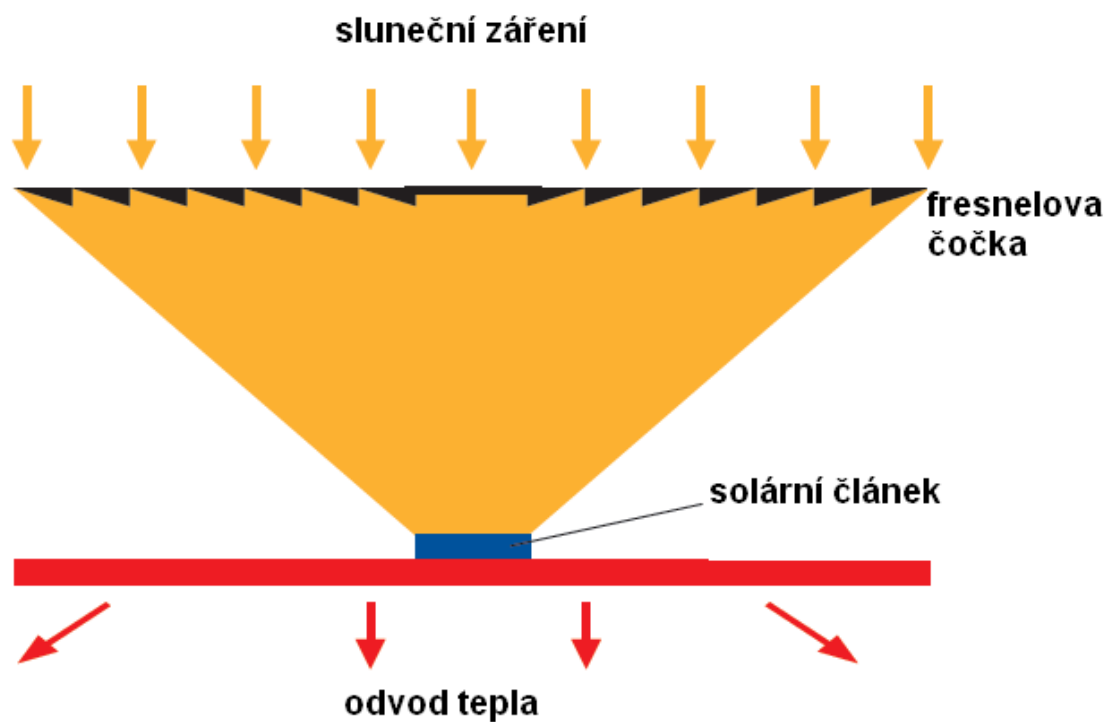
Podle stupně koncentrace se články s koncentrátorem dělí na články:

- a) s nízkou koncentrací (2 až 100 sluncí),
- b) články se střední koncentrací (100 až 300 sluncí)
- c) články s vysokou koncentrací (300 nebo více sluncí).

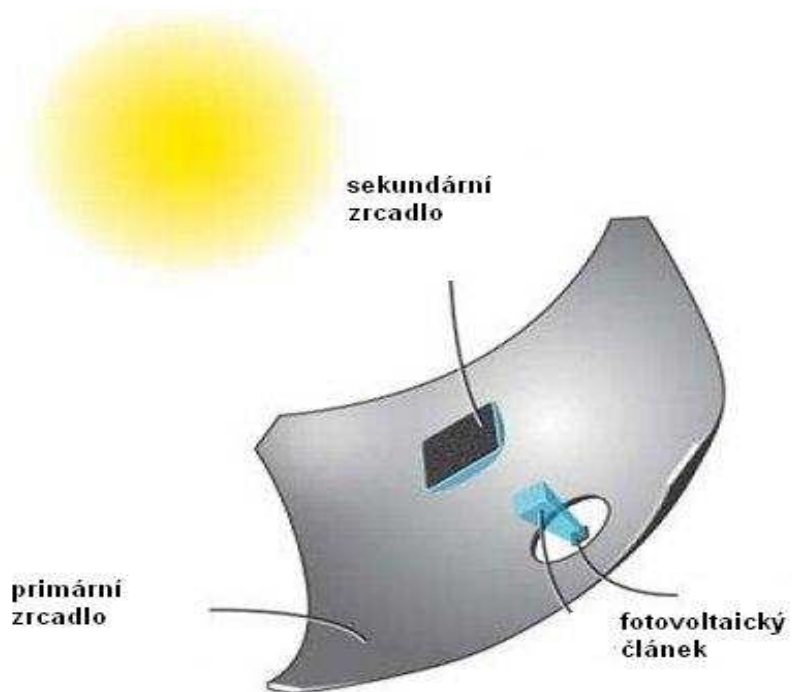
U těchto článků je důležité důkladné chlazení vlastního polovodičového čipu a často se též používá systém který natáčí články vždy směrem ke slunci (tracking system) – firma IBM demonstrovala v roce 2007 FV článek s koncentrátorem s koncentrací 2300 sluncí s využitím znalostí chlazení počítačových čipů [3].

Typickým příkladem řešení optického koncentrátoru s čočkou je použití fresnelovy čočky, která má obdobné optické vlastnosti jako klasická čočka, ale je výrobně jednodušší a tudíž levnější. Schéma je na obrázku číslo 3 [8].

Další možností je koncentrovat sluneční záření pomocí zrcadel, například jako je tomu na obrázku číslo 4. [8]



**Obr. 3:** Koncentrátorový fotovoltaický článek s fresnelovou čočkou [8]

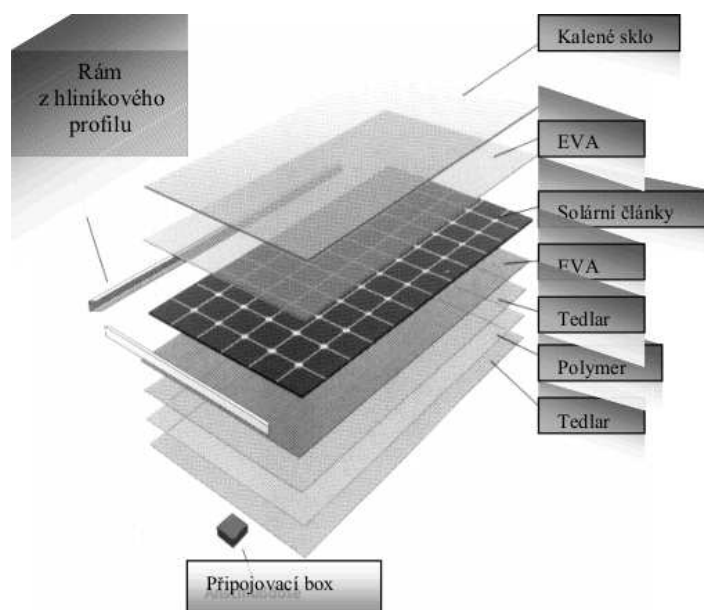


**Obr. 4:** Fotovoltaický článek s koncentrátorem s koncentrací pomocí zrcadel [8]

## 2.5 Fotovoltaický panel

Sériovým nebo i paralelním elektrickým propojením solárních článků vzniká po jejich zapouzdření fotovoltaický panel. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, musí zajišťovat dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost (např. vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.). Konstrukce solárních panelů jsou značně rozmanité podle druhu použití. Obvykle jsou po obvodu FV panely opatřeny duralovými rámy pro zpevnění celé konstrukce fotovoltaického panelu a zároveň k usnadnění realizace uchycení panelů ke konstrukci FV systému. Přední krycí materiál je speciální kalené sklo, které odolává i silnému krupobití [1].

Z obrázku 5 je patrná poměrně složitá konstrukce panelu realizovaná v průběhu procesu výroby panelů – laminace.



**Obr. 5:** Složení fotovoltaického panelu [1]

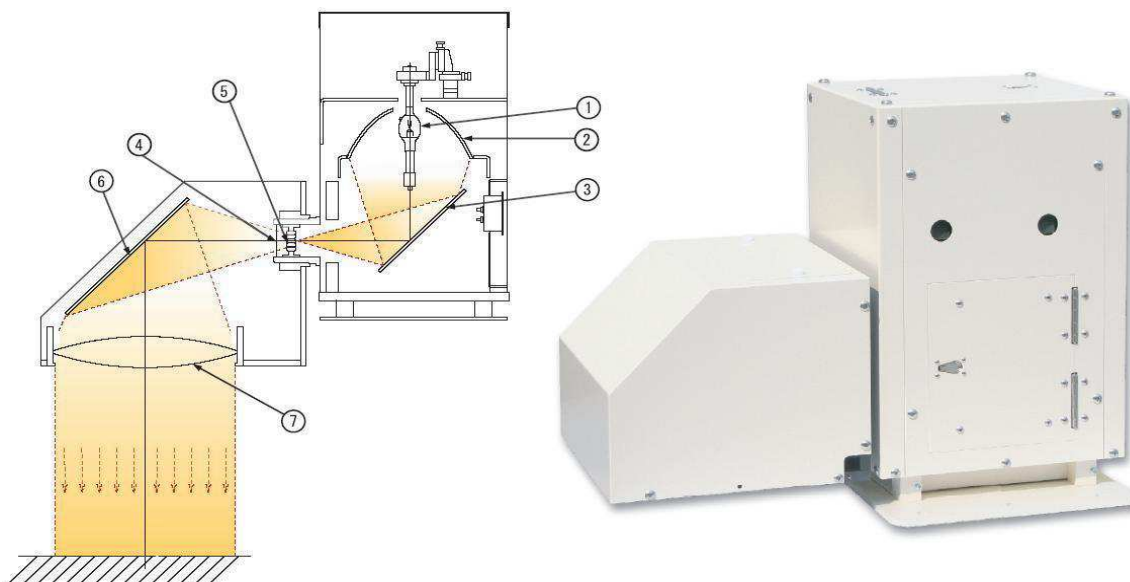
## 2.6 Základní měření na fotovoltaických článcích

Pro základní měření na FVČ/FVP je třeba mít k dispozici tyto základní přístroje a pomůcky:

- a) digitální ampérmetr, voltmetr a teploměr s dotykovou a prostorovou sondou
- b) měřený fotovoltaický článek (FVČ), fotovoltaický panel (FVP)
- c) proměnný reostat (lepší je mít dva pro jemnější nastavení)
- d) napájecí zdroj s výstupním proudem až několik jednotek A
- e) zdroj světla
- f) metr, posuvné měřítko a případně úhloměr
- g) zdroj tepla (například fén s pevným uchycením)

Pro měření na větších FVČ, na jejich různých zapojeních, případně na menších FVP, je potřeba mít k dispozici vhodný světelný zdroj. Při měření je potřeba, aby FVČ/FVP byl osvětlen na celé ploše stejně. U dílčích FVČ a menších FVP si vystačíme se zdrojem s halogenovou výbojkou.[4]

Pro profesionální účely se používají zdroje světla s xenonovou výbojkou, která má světelné spektrum nejbližší slunci. Příklad takového zdroje pro měření FVČ je uveden na obrázku 6. [5]



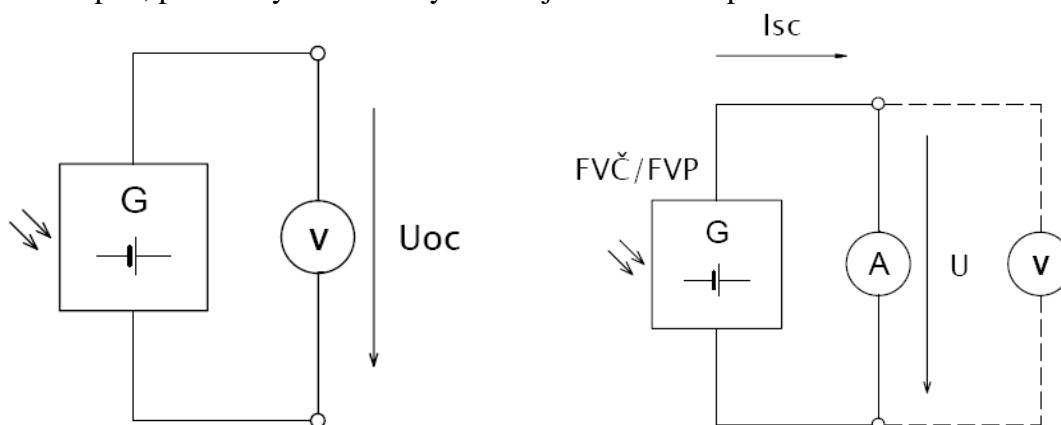
1 – xenonová výbojka, 2 – eliptický zrcadlový koncentrátor, 3 a 6 – rovinné odrazové zrcadlo, 4 – AM filtr (Air Mass), 5 – integrační čočka, 7 – kolimátor

**Obr. 6:** Příklad laboratorního zdroje světla pro měření FVČ [5]

### 2.6.1 Měření naprázdno

Napětí naprázdno je napětí na svorkách FVČ/FVP, na který není připojena žádná zátěž. Toto napětí měříme pomocí paralelně připojeného voltmetru, který by měl mít co největší vstupní odpor, aby nedocházelo k zatěžování FVČ/FVP. [7].

Při měření napětí naprázdno digitálním voltmetrem můžeme zanedbat metodickou chybu při měření napětí, protože tyto voltmetry dosahují vnitřního odporu  $10\text{ M}\Omega$  a více.



**Obr. 7:** Schéma zapojení pro měření naprázdno (vlevo) a nakrátko (vpravo) [4]

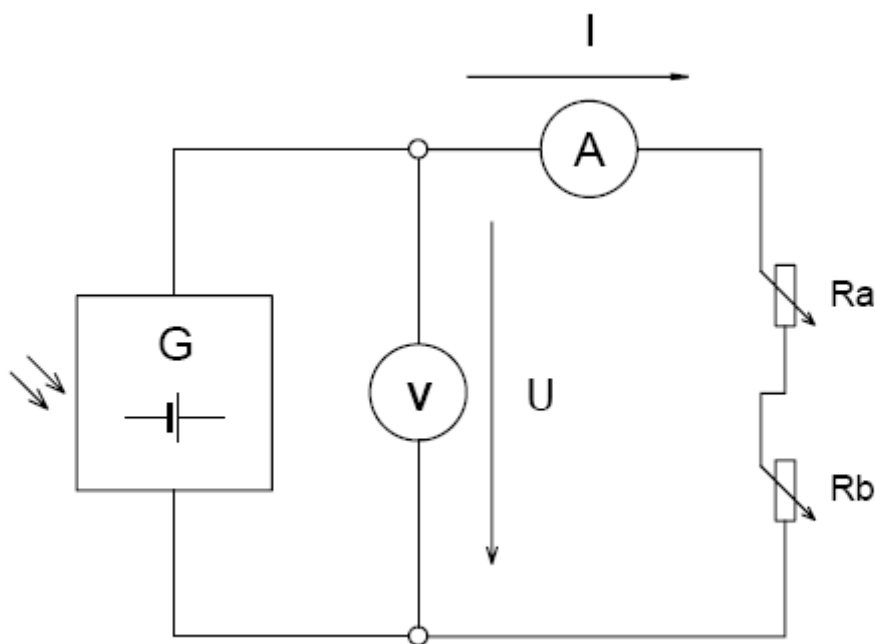
### 2.6.2 Měření nakrátko

Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách  $mA$ , až jednotek  $A$ . Největší běžně dostupné FVČ mají při plném ozáření proud nakrátko nad hranicí  $6A$ . Běžné ampérmetry mívají vnitřní odpor přibližně  $100\text{ m}\Omega$ . Při měření proudu nakrátko takovýmto ampérmetrem vzniká na elektrodách FVČ napětí kolem  $300\text{ mV}$ . Vnitřní odpor ampérmetru způsobuje metodickou chybu měření, kterou lze odstranit použitím speciálního přístroje/přípravku nebo početní korekcí metodické chyby.



### 2.6.3 Měření Volt – Ampérové charakteristiky

Při měření VA charakteristiky FVČ/FVP zjišťujeme závislost proudu na napětí při dané intenzitě osvětlení a teplotě. FVČ/FVP je osvětlován ze zdroje světla a na jeho výstupní svorky je zapojen měřicí obvod, který se skládá z voltmetru, ampérmetru a zatěžovacího rezistoru s proměnným odporem. Voltmetr je zapojen přímo paralelně na svorky měřeného FVČ/FVP, abychom neměřili navíc úbytek napětí na sériově zapojeném ampérmetru. Odporovou zátěž je vhodnější složit ze dvou sériově zapojených reostatů pro jemnější nastavení odporu zátěže. Reostaty musí být vhodně vybrány tak, abychom mohli pokud možno proměřit celou VA charakteristiku a zároveň aby nedošlo k jejich přetěžování ztrátovým výkonem v podobě tepla. Zpravidla je na reostatech uváděn jejich odpor a maximální proud  $I_{max}$ , který jimi může téct; tento proud by neměl být menší než proud nakrátko  $I_{SC}$ . Na reostatech se zároveň uvádí maximální napětí  $U_{max}$ , které je ale většinou vždy podstatně vyšší než napětí na FVČ/FVP [4].



**Obr. 8:** Schéma zapojení pro měření V-A charakteristiky [4]

## 2.7 Přírodní podmínky pro fotovoltaiku

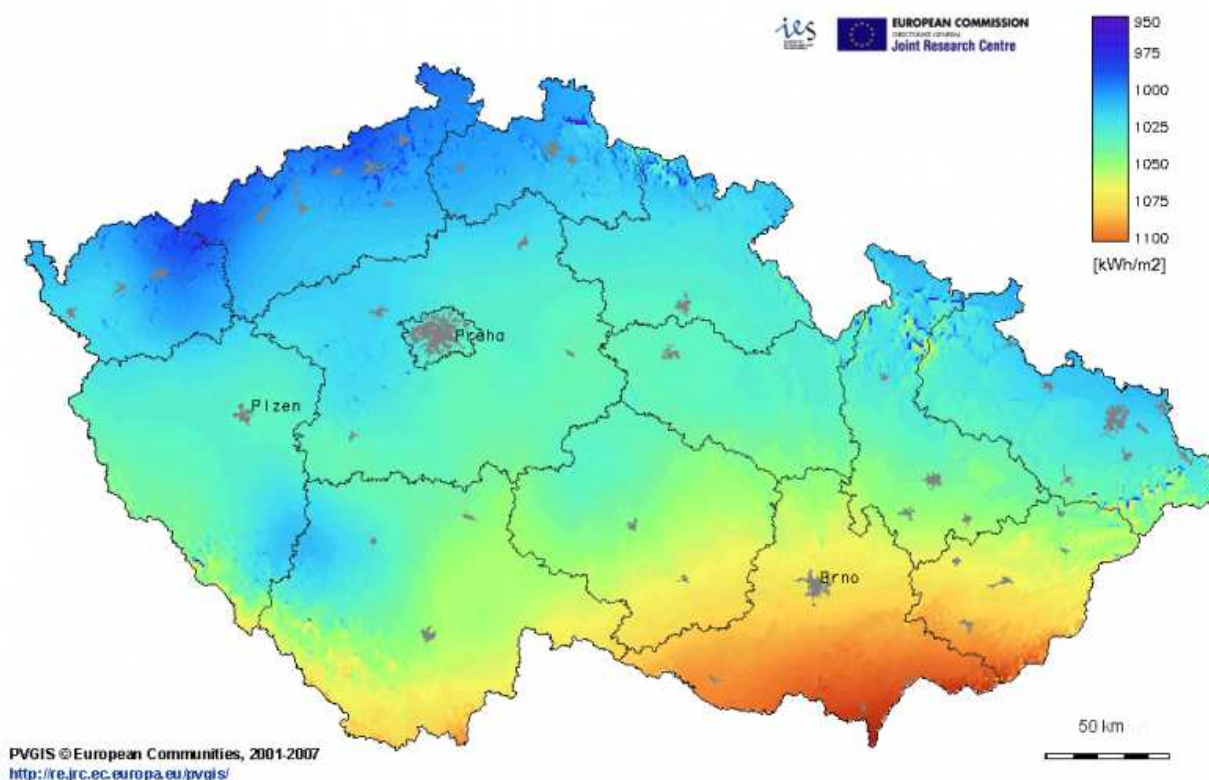
### 2.7.1 Přírodní podmínky v ČR

Dostupnost solární energie v České republice je ovlivněna mnoha faktory. Patří mezi ně především zeměpisná šířka, roční doba, oblačnost a lokální podmínky, sklon plochy na níž sluneční záření dopadá a další.

Z dosud publikovaných informací je možno dojít k následujícím výsledkům:

- v České republice dopadne na 1m<sup>2</sup> vodorovné plochy zhruba 950 – 1340 kWh energie
- roční množství slunečních hodin se pohybuje v rozmezí 1331 –1844 hod (ČHMÚ) [1].

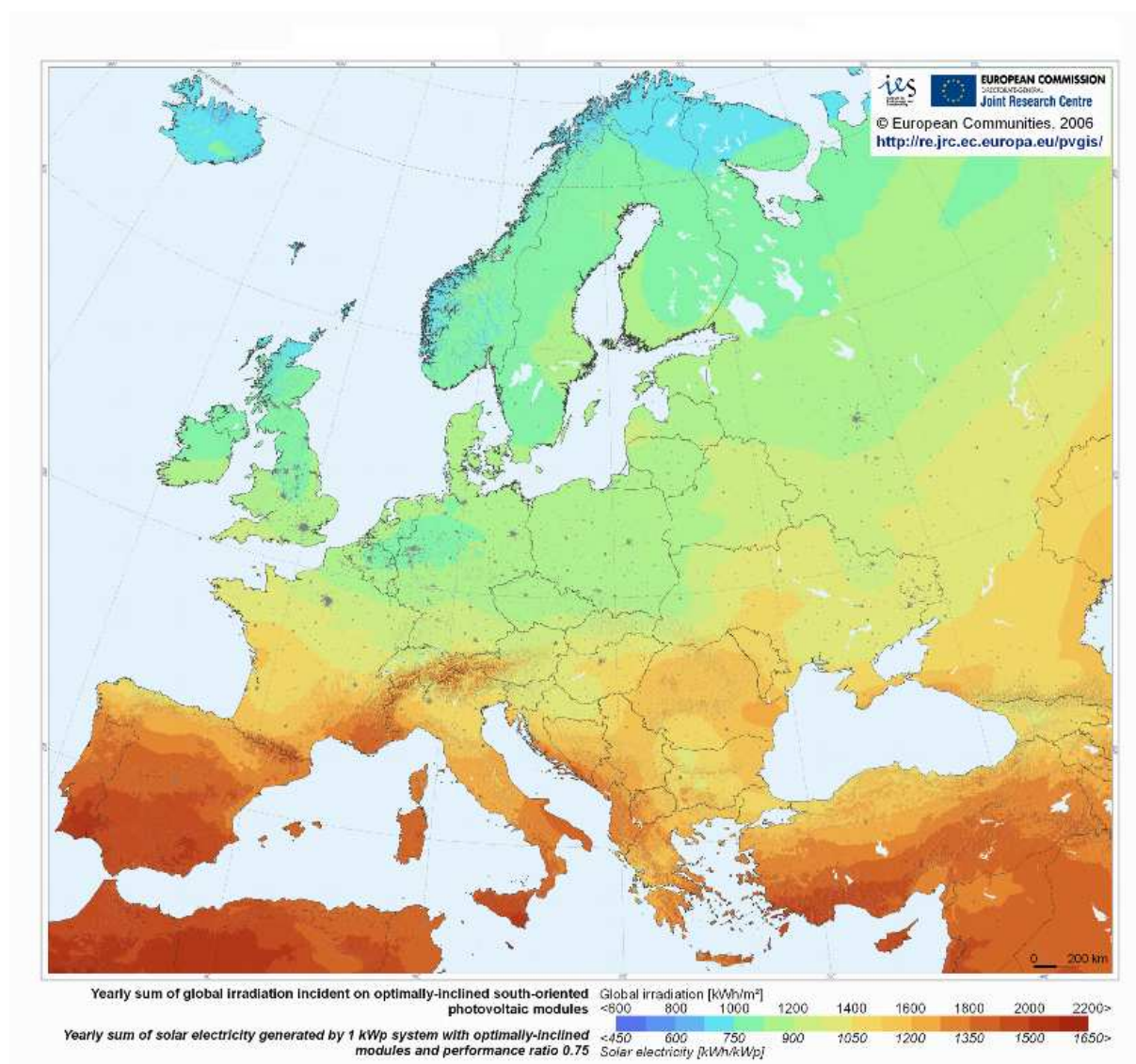
Roční množství solární energie dopadající na vodorovné plochy v ČR je znázorněno na mapě obr. 9.



**Obr. 9:** Mapa globálního slunečního záření na území ČR (kWh/m<sup>2</sup> za rok) [16]

### 2.7.2 Přírodní podmínky v Evropě

Fotovoltaické panely s koncentrátory nejsou schopné plně využít difúzní záření (nelze koncentrovat). Poměr přímého a difúzního záření je závislý na geografických a mikroklimatických podmínkách. Ve střední Evropě tvoří difúzní záření v celoročním průměru 50 - 70 % z globálního záření, přičemž v zimě dosahuje až 90 % podíl. [16] Proto není jejich použití v naší zeměpisné šířce zrovna nejvhodnější. Mnohem výhodnější by bylo jejich použití na místech s větším množstvím dopadající sluneční energie a hlavně s větším množstvím slunečních hodin (minimum oblačnosti), tyto požadavky splňují země jižní Evropy (např. Španělsko, Itálie, atd.) a severní Afriky viz. obrázek 10.



Obr. 10: Mapa globálního slunečního záření na území Evropy ( $\text{kWh/m}^2$  za rok) [16]

### 3 Koncentrátorové prvky

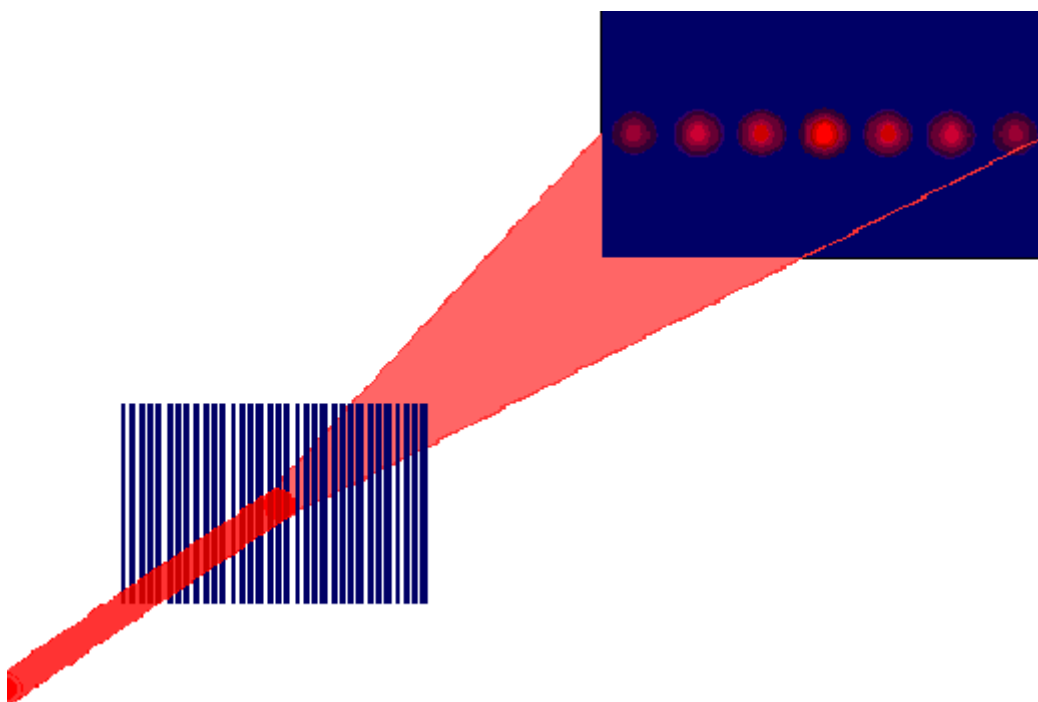
Základem optické části je koncentrátor slunečního záření. Koncentrátor bude připraven pomocí elektronové litografie a následně sériově vyráběn lisováním. Uvažuje se využití tenké desky z polykarbonátu (PC) tloušťky 5 až 10 mm (popřípadě by bylo možné aplikovat difrakční fólii na nosnou skleněnou tabuli).

#### 3.1 Ohyb světla na optické (difrakční) mřížce

Difrakční mřížku si v nejjednodušším případě představíme jako soustavu velkého množství pravidelně rozložených štěrbin (nebo vrypů, proužků apod.), vzdálených od sebe o **periodu mřížky**  $\Lambda$ . Na těchto štěrbinách nastává difrakce dopadajícího záření. Základní vlastností difrakční mřížky je její schopnost rozkládat světlo na jednotlivé spektrální (monochromatické) složky (podle vlnových délek). Pro intenzitu záření difraktovaného na difrakční mřížce ve formě štěrbin platí (v rámci Fraunhoferovy difrakce):

$$I = I_0 \left( \frac{\sin B}{B} \right)^2 \left( \frac{\sin NA}{A} \right)^2 \quad A = \frac{\pi}{\lambda} \Lambda (\sin \Theta_i - \sin \Theta_d) \quad B = \frac{\pi}{\lambda} b (\sin \Theta_i - \sin \Theta_d)$$

kde  $b$  je šířka štěrbin,  $\Lambda$  je perioda mřížky,  $N$  je počet štěrbin,  $I_0$  je intenzita v tzv. nultém řádu difrakce (  $\Theta_i = \Theta_d$  ),  $\Theta_i$  je úhel dopadu,  $\Theta_d$  je úhel difrakce. Druhý člen vyjadřuje intenzitu vzniklou ohybem na jedné štěrbině šířky  $b$ , a třetí člen intenzitu vzniklou interferencí vln od jednotlivých štěrbin. Difrakční obrazec má velmi úzká interferenční minima a maxima, které jsou od sebe vzdáleny tím více, čím je perioda mřížky menší. Difrakce na pravidelné (neomezené) mřížce je znázorněna na obrázku č. 11. Jak je vidět, v obecném případě může vzniknout mnoho prostorově oddělených vln (difrakčních řádů).  
[12]

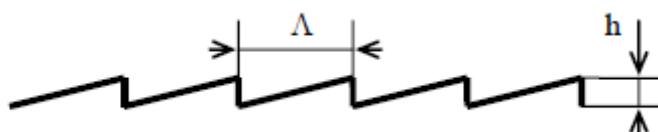


Obr. 11: Difrakce na mřížce [12]

### 3.2 Návrh difrakčních koncentračních struktur

Difrakční struktury mřížky mohou světlo propouštět nebo odrážet. Prochází-li světlo, je měněna jeho amplituda nebo fáze. Při odrazu světla dochází zpravidla pouze ke změně fáze (resp. k její modulaci).

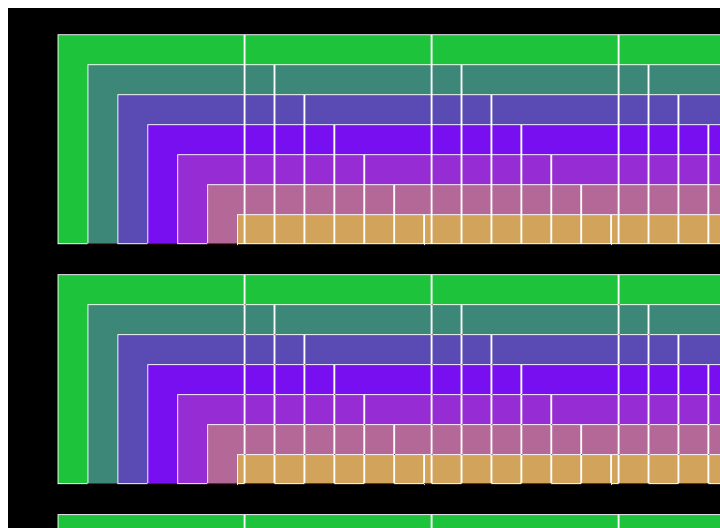
Difrakční mřížka je pravidelná reliéfní struktura s danou periodou  $\Lambda$  a hloubkou  $h$ . [15]



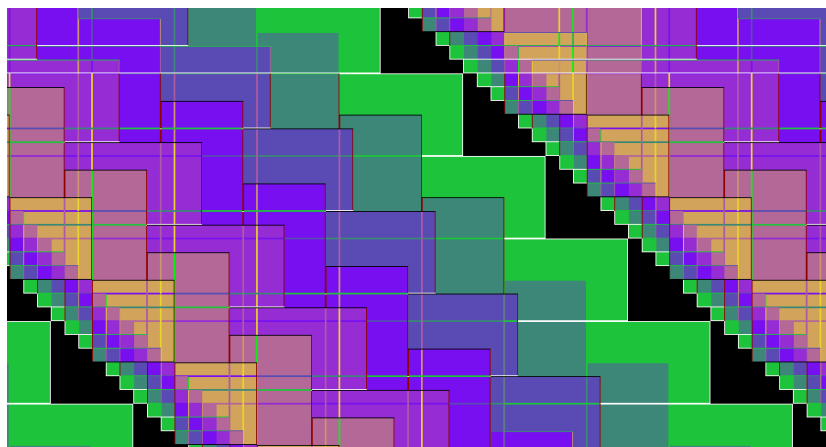
Obr. 12: Difrakční mřížka [15]

Popisované mřížky jsou realizovány ve vrstvě elektronového rezistu. Pomocí expozice a následného vyvolání vznikne reliéfní struktura. Realizovaná struktura se liší od ideální binární mřížky zejména v následujících ohledech. Litograf pracuje v rozlišení 100 nm. Reliéf základní čáry otočené mřížky má tedy schodkovitou topologii. Je-li požadován pilový profil

difraktivní struktury, je reliéf rozdělen na zvolený počet úrovní a výsledný reliéf má schodkovitý profil. Litograf pracuje s tvarovaným svazkem, danou topologií je tedy nutné vyplnit elementárními obdélníkovými expozicemi s nezávisle nastavitelnou velikostí jednotlivých stran. Velikost elementární expozice je volena s ohledem na minimalizaci celkového času expozice a zachování homogenity plochy elementární expozice. Na obrázcích 13 a 14 jsou příklady struktur navržených v programu Expo, struktura se skládá ze  $7 + 1$  úrovní (černá barva = neexponováno, zelená = 1 razítko atd.). Další příčinou odlišností realizovaných struktur od ideálních je rozptyl elektronů (dopředný rozptyl a rozptyl zpětně odražených elektronů). [15]



**Obr. 13:** Detail rohu vodorovné struktury



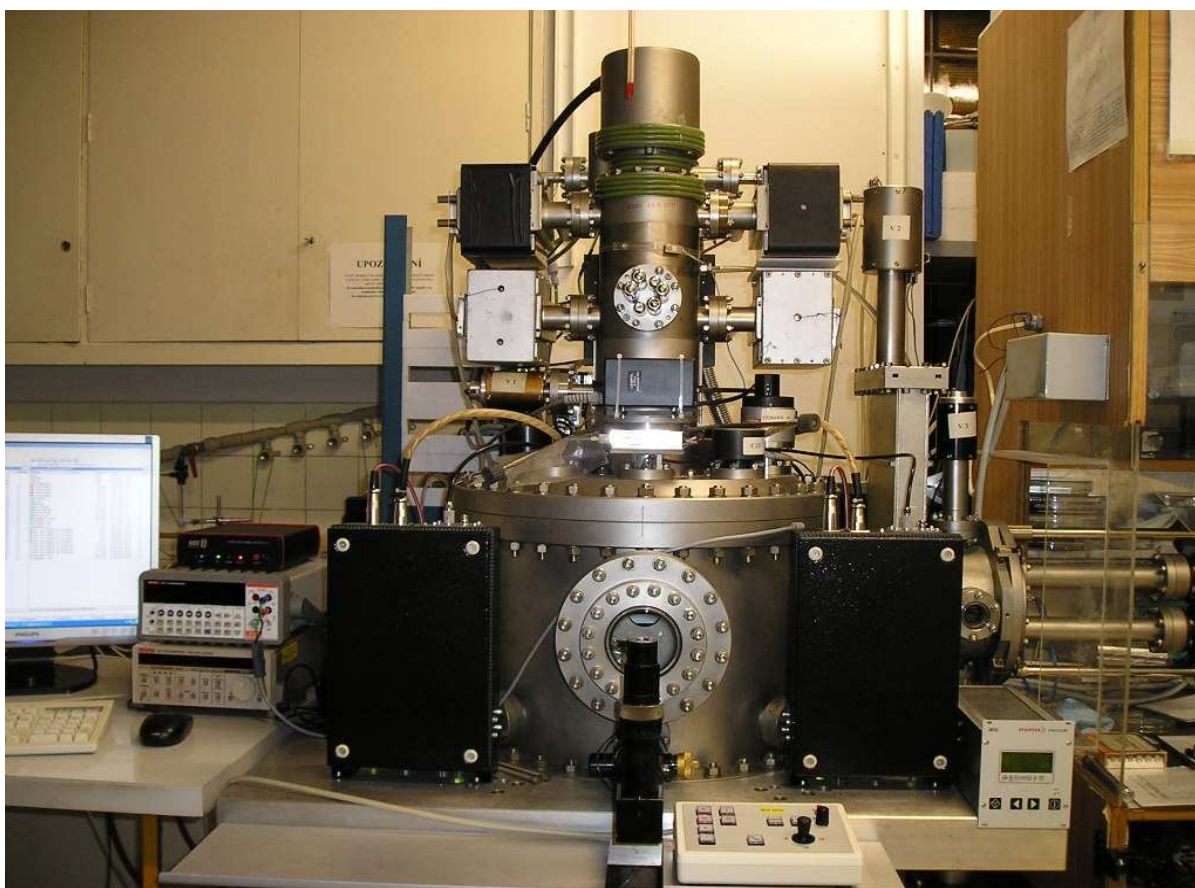
**Obr. 14:** Detail otočené struktury 45°



### 3.3 Elektronová litografie

Elektronový litograf (generátor předloh) pracující s elektronovým svazkem obdélníkového průřezu s proměnnou velikostí (Tesla BS600+) umožňuje rychlou expozici obrazových předloh ve velkém rozlišení do tenké vrstvy rezistu nanesené na křemíkové nebo skleněné podložce. Základní krok zapisovacího zařízení je 50 nm; maximální hustota zapisovaných periodických struktur je asi 2 000 čar na milimetr. [14]

Požadovaný obrazec se zaznamená do tenké vrstvy elektronového rezistu (expozicí vznikne latentní obraz). Vyvoláním exponované vrstvy rezistu (v odpovídající vývojce) se vytvoří planární rezistová maska, přes kterou je možné opracovat povrch podložky (substrátu) nebo tenkou funkční vrstvu (zpravidla kov nebo dielektrikum) předem na nosném substrátu nanesenou. [14]



**Obr. 15:** Elektronový litograf Tesla BS600+

## **4 Ekonomické aspekty fotovoltaiky**

### **4.1 Ekonomická návratnost**

Zhodnocení ekonomické návratnosti fotovoltaických systémů není jednoduché. Základní determinantou pro její určení je investiční cena a množství vyrobené elektřiny v závislosti na technických parametrech systému (použité komponenty, výkon, sklon panelů, umístění systému na střeše nebo zemi atd.) a jeho geografickém umístění.

Celkové náklady FV elektráren silně závisí na cenách panelů, které byly na evropském trhu až do konce roku 2008 v podstatě stabilní. Významněji klesaly pouze náklady na kompletaci elektráren, tento trend se však v roce 2008 téměř zastavil. Prudký pokles cen panelů nastal teprve v roce 2009. [6].

Výkon se u fotovoltaických zařízení vyjadřuje obvykle v kWp. Kilowatt peak je jednotka výkonu solárního článku nebo panelu v bodě maximálního výkonu za standardních testovacích podmínek (1000W/m<sup>2</sup>; AM 1,5; 25°C). V podmínkách České republiky vyrobí 1 kWp (cca 10 m<sup>2</sup> panelů) průměrně 800 – 1100 kWh elektrické energie za rok (za předpokladu FV článků z monokrystalického, popř. polykrystalického křemíku, běžná účinnost střídačů apod.) [1].

### **4.2 Mechanismus výkupních cen a zelených bonusů**

Česká republika se rozhodla pro podporu využívání obnovitelných zdrojů zavést u elektřiny vyráběné pomocí fotovoltaických systémů mechanismus výkupních cen (feed-in tarif) v kombinaci se systémem „zelených bonusů“.

Princip výkupních cen znamená, že zákonem č. 180/2005 Sb. byla stanovena povinnost pro provozovatele přenosové nebo distribuční soustavy připojit fotovoltaický systém do přenosové soustavy a veškerou vyrobenou elektřinu vykoupit. Výkup má probíhat za cenu



určenou pro daný rok Energetickým regulačním úřadem a tato cena má být vyplácena jako minimální po dobu následujících patnáct let [1].

Při využití principu zelených bonusů si výrobce na trhu musí najít obchodníka, kterému elektřinu prodá za tržní cenu. Cena je nižší než u konvenční elektřiny, protože v sobě obsahuje nestabilitu výroby, a je různá pro různé typy obnovitelných zdrojů energie (OZE). V momentu prodeje získá výrobce od provozovatele distribuční soustavy tzv. zelený bonus neboli prémii. Regulační úřad stanoví výši premií tak, aby výrobce získal za jednotku prodané elektřiny o něco vyšší částku než v systému pevných výkupních cen [1].

V listopadu 2010 došlo k novelizaci zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů energie. Na elektřinu z velkých slunečních elektráren s instalovaným výkonem výroby 30 kW a vyšším uvedených do provozu od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2010 byla zavedena daň ve výši 26% výkupní ceny, popřípadě 28 % zeleného bonusu. [17]

## **5 Praktická část diplomové práce**

**Praktická část diplomové práce je chráněna licenční smlouvou. Pro veřejnost bude na FEKT VUT volně dostupná od července 2016.**

## 7 Použitá literatura

- [1] Česká agentura pro obnovitelné zdroje energie . [cit. 2010-11-08]. Dostupné z WWW:  
< <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#fv>
- [2] Fotovoltaický článek [cit. 2010-11-08]. Dostupné z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaiický\\_článek](http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaiický_článek)
- [3] koncentrátorový článek . [cit. 2010-11-14]. Dostupné z WWW:  
<http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf>
- [4] Bannert P.: Základní měření na fotovoltaických článcích. Varnsdorf: VOŠ Varnsdorf
- [5] laboratorního zdroje světla pro měření FVČ. [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW:  
<http://www.san-eielectric.co.jp/e/indu1.htm>
- [6] Stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov. [cit. 2011-04-03]. Dostupné z WWW: <http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5983&h=303&pl=49>
- [7] S. Kučerová.: Energetické využití slunečního záření v Jihomoravském kraji, posouzení vlivu na životní prostředí, VUT Brno 2009
- [8] Global energy network institute. [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW:  
<http://www.geni.org>
- [9] Křemíkový wafer. [cit. 2011-04-15]. Dostupné z WWW: HLS Solar Live LLC
- [10] cuprexitová deska. [cit. 2011-04-15]. Dostupné z WWW:  
<http://www.soselectronic.cz>
- [11] Polykarbonátové desky. [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW:  
<http://www.polykarbonatove-desky.cz>
- [12] Difrakční mřížky. [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW:  
<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node10.html>
- [13] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Praha : Prometheus, 2001. 1278 s.
- [14] Průvodce aplikačními možnostmi Ústavu přístrojové techniky AV ČR.  
[cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW:  
<http://alisi.isibrno.cz/upload/files/brozura-dotisk-cz.pdf>

- [15] DANĚK, L. Reliéfní difraktivní struktury pro optické elementy realizované pomocí elektronové litografie. Brno, 2008. 72 s. Disertační práce. VUT.
- [16] Photovoltaic Geographical Information System. [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [17] Poslanecká sněmovna. novela zákona č. 180/2005 Sb o podpoře využívání obnovitelných zdrojů energie. [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <http://www.psp.cz/sqw/text/tiskt.sqw?o=6&ct=145&ct1=0&v=PZ&pn=2&pt=1>

## Seznam obrázků:

|  |    |
|--|----|
| <b>Obr. 1:</b> Fotovoltaický článek [4] .....  | 10 |
| <b>Obr. 2:</b> Spektrum slunečního světla [4] .....  | 11 |
| <b>Obr. 3:</b> Koncentrátorový fotovoltaický článek s fresnelovou čočkou [8] .....                       | 13 |
| <b>Obr. 4:</b> Fotovoltaický článek s koncentrátorem s koncentrací pomocí zrcadel [8] .....              | 13 |
| <b>Obr. 5:</b> Složení fotovoltaického panelu [1] .....  | 14 |
| <b>Obr. 6:</b> Příklad laboratorního zdroje světla pro měření FVČ [5] .....                              | 15 |
| <b>Obr. 7:</b> Schéma zapojení pro měření naprázdno (vlevo) a nakrátko (vpravo) [4] .....                | 16 |
| <b>Obr. 8:</b> Schéma zapojení pro měření V-A charakteristiky [4] .....                                  | 17 |
| <b>Obr. 9:</b> Mapa globálního slunečního záření na území ČR (kWh/m <sup>2</sup> za rok) [16] .....      | 18 |
| <b>Obr. 10:</b> Mapa globálního slunečního záření na území Evropy (kWh/m <sup>2</sup> za rok) [16] ..... | 19 |
| <b>Obr. 11:</b> Difrakce na mřížce [12] .....  | 21 |
| <b>Obr. 12:</b> Difrakční mřížka [15] .....  | 21 |
| <b>Obr. 13:</b> Detail rohu vodorovné struktury .....  | 22 |
| <b>Obr. 14:</b> Detail otočené struktury 45° .....   | 22 |
| <b>Obr. 15:</b> Elektronový litograf Tesla BS600+ .....  | 23 |